

ABSORCIÓN Y ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN TRES ESPECIES VEGETALES EN SUELOS ENMENDADOS CON LODOS DE DEPURADORA.

Cabezas, J.G.(1); Alonso, J. (1); Pastor, J; (2) Sastre-Conde, I. (1); y Lobo, M.C (1)
(1) IMIA, Madrid (Spain) Email: jose.cabezas@madrid.org
(2) CCMA-CSIC, Madrid. (Spain).

RESUMEN

En el presente estudio se ha evaluado la capacidad de absorción y acumulación de metales pesados (Pb, Cu, Ni, Zn y Cr) en parte aérea (tallos y hojas) y raíces de tres especies vegetales, *Vicia sativa* L. (veza), *Hordeum vulgare* (cebada) y *Helianthus annuus* L. (girasol), sembradas en suelos enmendados con lodos de depuradora en condiciones de invernadero. Se aplicaron lodos compostados con restos de poda a un suelo degradado de carácter básico procedente de un cultivo abandonado en la zona Centro de España (Alcalá de Henares). Se realizaron 3 tratamientos distintos para cada una de las especies ensayadas: Testigo (sin adición de lodo); Dosis baja-media de lodo (42,5 t/ha) y Dosis alta de lodo (85 t/ha) y 3 repeticiones por tratamiento. Se analizó el efecto de la dosis de lodo aplicada en la capacidad de acumulación de metales en distintas partes de la planta, con el fin de evaluar la absorción y traslocación de cada elemento. Este hecho podría limitar la aplicación de este tipo de enmiendas en suelos agrícolas. Del mismo modo se ha evaluado la posibilidad de uso de estas especies en procesos de fitoextracción.

Las concentraciones totales de Cu, Zn, Cr y Pb en suelos incrementaron linealmente con la dosis de lodo aplicada en los ensayos con las tres especies vegetales, no observándose el mismo efecto para el Ni. En todos los casos, los valores de metales en los suelos fueron menores que los límites establecidos en la legislación (Directiva 86/278/CEE). En el análisis de metales en planta se observó en la cebada un incremento lineal en el contenido de todos los metales (excepto el Zn) en la parte aérea con la aplicación de lodos, sin embargo este efecto no se produjo tan marcadamente en el girasol y la veza aunque sí aumentó el contenido de metales en las plantas cultivadas en suelos enmendados con lodos. El contenido de metales totales en el sistema radicular de la cebada incrementó con la dosis de lodo aplicada. Esta misma tendencia se produjo en la veza para el Pb, Cu y Zn, y en el girasol para el Cu. En general las cantidades de metales acumuladas en la planta fueron mayores en la cebada que en la veza y el girasol, siendo significativos los valores en el caso del Cu, Ni y Cr. Este hecho implica la necesidad del control de los contenidos en metales pesados en cereales para evitar su paso a la cadena alimentaria.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las políticas medioambientales priorizan como vía de eliminación de los residuos orgánicos y en particular de los lodos de depuradora, su reutilización como

enmienda en suelos, a fin de aprovechar los recursos en ellos contenidos, fundamentalmente materia orgánica y elementos nutritivos.

Todos estos materiales residuales contienen concentraciones en ocasiones elevadas de metales pesados, que podrían constituir un riesgo de contaminación para el sistema edáfico (Williams, et al., 1980; Chang; et al, 1984; Witte, H., 1988; Schmidt, 1997, Sastre, et al., 2001), e incluso para el hombre si se movilizan a aguas subterráneas o se acumulan en los productos agrarios, pudiendo pasar a la cadena alimentaria (Davis, 1981; Fitzgerald, 1985; Korentejar, 1991).

La toxicidad de los metales no depende solamente de su concentración total, sino de su disponibilidad y reactividad con otros componentes del sistema. La disponibilidad de los metales en los suelos está estrechamente relacionada con el pH, el tipo de materia orgánica (sustancias húmicas en forma soluble o insoluble) e incluso la temperatura del suelo (McBride, et al., 1997; Almas y Singh, 2000; Varanini y Pinto, 2000). Abollino et al. (2002) comprobaron que la movilidad de metales pesados es mayor en suelos no contaminados. Durante el período inicial de aplicación, la materia orgánica de los lodos mejora las propiedades del suelo y controla la solubilidad de los metales, protegiendo a la planta de una posible acumulación (McBride, 1995). Sin embargo, con el paso del tiempo estos beneficios disminuyen con la mineralización de la fracción orgánica de los lodos.

Durante las últimas dos décadas se han realizado estudios enfocados a la evaluación de los efectos de la aplicación de lodos residuales sobre las propiedades físico-químicas de suelos agrícolas, su influencia en el crecimiento de los cultivos y las interacciones en el sistema suelo planta (Coker y Mathews, 1983; Vlamis et al. 1985; Sastre, et al., 1993; Chaney, 1994; Oberle y Keeney, 1994; Hooda et al. 1997). En los últimos años los estudios se han encaminado a la realización de ensayos de sostenibilidad, recuperación y remediación de áreas degradadas y/o contaminadas (Sopper, 1993; Hearing, 2000; Kannavou, et al., 2000; Gil, et al. 2001; Brown, 2003; Cabezas, J.G., 2003;). En estos estudios con metales pesados se han utilizado especies autóctonas o de cultivos agrícolas de la zona como alternativa a las especies hiperacumuladoras exóticas. Estas especies autóctonas poseen menor capacidad de acumulación pero mayor producción de biomasa (Salt et al, 1998).

La absorción y acumulación de metales por las plantas cultivadas en suelos enmendados con lodos exhibe frecuentemente una respuesta que ha sido definida como "plateau hypothesis" (Chaney y Ryan, 1993). La absorción de metales por la planta aumenta al incrementarse la concentración total de metales en suelos, es decir al aumentar la dosis de lodos aplicada, hasta que alcanza un valor máximo o umbral a partir del cual la planta no responde a mayores aplicaciones de lodos. Este umbral es diferente para cada especie vegetal en función de sus estrategias para tolerar elevadas concentraciones de metales en suelos. Por este motivo es interesante evaluar el comportamiento de distintas especies vegetales sometidas a distintas dosis de lodos de depuradora.

En el presente estudio se han elegido para el ensayo tres cultivos anuales, cebada, girasol y veza, adaptados al clima de la zona centro de España, de fácil producción y bajo coste, y con precedentes bibliográficos para la fitorremediación de metales pesados (Vlamis, et al, 1985; Nelessen y Fletcher, 1993; Quinteiro Rodríguez, 1998; Brown, 2003; Rodríguez, et al., 2003). Madrid y Kirkham (2002) obtuvieron

mejores resultados de acumulación de metales pesados en plantas de cebada que el girasol, señalando que la cebada sería más adecuada para estudios de fitoremediación.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de absorción y acumulación de metales pesados de tres especies vegetales (cebada, veza y girasol) propias de climas mediterráneos, cultivadas en suelos enmendados con distintas dosis de un lodo compostado con restos de poda así como su posible aptitud para su utilización en procesos de fitorremediación de suelos con un grado bajo de contaminación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se aplicaron lodos compostados con restos de poda (CP) procedentes de una depuradora de aguas residuales urbanas a un suelo degradado (S) en macetas circulares de polietileno en condiciones de invernadero. El suelo utilizado fue un Typic calcixerept procedente de un cultivo abandonado en la zona Centro de España, (Alcalá de Henares), cuyas características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Caracterización del suelo y el lodo de depuradora utilizados.

	pH	C.E. (mS/cm)	N (%)	C (%)	P (%)	Ca	Mg	Na	K	Ni	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn
			(%)			(mg / Kg)									
S	8,45	0,25	0,09	1,04	24	3441	529	13	370	12	18	0,8	11	20	99
CP	6,07	9,15	1,81	19,78	287	17606	2339	703	2640	125	503	4,8	505	593	1602

Se realizaron 3 tratamientos distintos para cada una de las especies ensayadas: Testigo (sin adición de lodo); Dosis baja-media de lodo (42,5 t/ha) y Dosis alta de lodo (85 t/ha) y 3 repeticiones por tratamiento. En cada una de las macetas se sembraron 4 semillas para cada una de las tres especies: *Vicia sativa* L. (veza común), *Hordeum vulgare* (cebada var. Reinette) y *Helianthus annuus* L. (girasol var. Toledo II). La experiencia se mantuvo durante 150 días, regando según requerimientos hídricos, al cabo de los cuales se muestrearon los suelos y se recogió la planta entera, tanto raíz como parte aérea, para estimar su biomasa y sus dimensiones.

Métodos

El pH se determinó en la relación suelo/agua 1:2,5 al igual que la conductividad eléctrica. El nitrógeno total se determinó por el método Kjeldahl. La materia orgánica de acuerdo con el método de Walkey Black. El fósforo se determinó por el método Olsen y los nutrientes asimilables se extrajeron con acetato amónico y posterior determinación por espectrofotometría de Absorción Atómica. La concentración de metales pesados se determinó por espectrofotometría de emisión por plasma (ICP), previa digestión ácida en digestor por microondas en el caso de suelos y lodos, y previa digestión ácida de las cenizas en el material vegetal. En todos los casos se siguieron los métodos oficiales de análisis en España (Ministerio de Agricultura, 1994).

Estudio estadístico

Todos los resultados mostrados constituyen la media de tres repeticiones. El estudio estadístico se llevó a cabo mediante el programa informático SPSS 10 entorno Windows realizándose un análisis de varianza (ANOVA, con $P \leq 0,05$) con aplicación del test de Duncan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Efecto en el suelo.

La aplicación de los lodos produjo una ligera acidificación de los suelos así como un aumento considerable de la conductividad eléctrica (tabla 2), obteniéndose un elevado coeficiente de correlación inverso entre ellos (tabla 4). Se produjeron diferencias significativas en ambos parámetros en función de la aplicación o no de lodo y de la dosis de lodo aplicada. Este es un importante aspecto a considerar y controlar de cara a la aplicación de este tipo de residuos en suelos pues pueden aparecer problemas por salinidad. El contenido en cationes disponibles (Ca, K, Na y Mg) en el suelo no varió significativamente con la adición de lodos, si bien en la cebada se produjo un ligero aumento de Ca y Mg según la dosis de lodo aplicada. Sin embargo, sí que se encontraron diferencias significativas en el contenido de K y Mg en los suelos en función de la planta cultivada. De esta forma, la cebada y el girasol se comportaron de una forma similar en cuanto al contenido de estos dos macronutrientes en suelos mientras que la veza constituyó otro grupo independiente (figura 1).

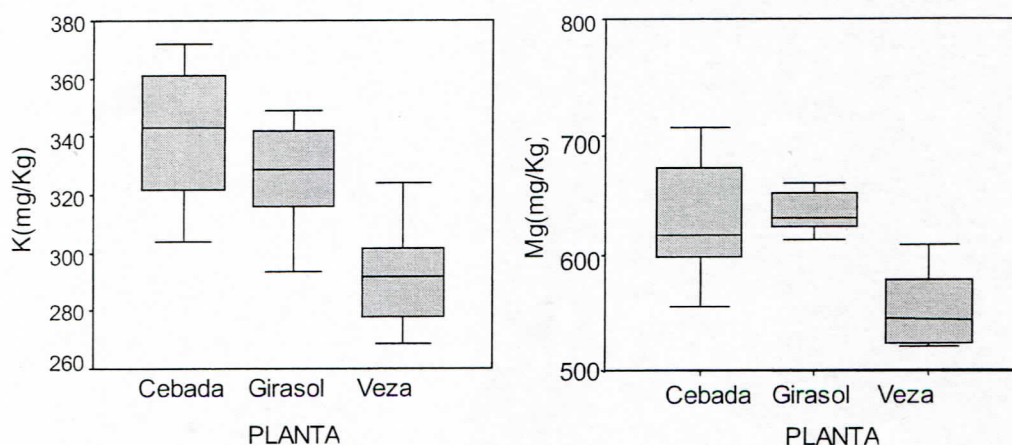


Figura 1: Diferencias significativas ($P < 0,05$) por especie cultivada para el contenido de K y Mg en suelos.

El N total se incrementó linealmente con la aplicación de lodos, si bien no se encontraron diferencias significativas entre las dosis. El contenido en P asimilable aumentó significativamente con la aplicación de lodos, encontrándose diferencias significativas entre las dosis ensayadas. El análisis de la materia orgánica oxidable en

los suelos, mostró un incremento significativo con la aplicación de lodos, aunque no se encontraron diferencias significativas entre las dos dosis de lodos ensayadas.

La aplicación de lodos compostados produjo un aumento en los valores de extracto húmico total de los suelos (EHT), siendo las fracciones de menor peso molecular (Ácidos Fúlvicos) las que experimentaron el incremento al proporcionar los residuos utilizados formas de materia orgánica poco transformadas. Este aumento quedó reflejado en diferencias significativas en el contenido de carbono en los ácidos fúlvicos en suelos entre los tratamientos que aplicaban lodos y los testigos (no se encontraron diferencias significativas para los Ácidos Húmicos).

Tabla 2: Características físico-químicas del suelo y fraccionamiento de la materia orgánica (AH: Ácidos Húmicos, AF: Ácidos Fúlvicos y EHT: Extracto Húmico Total).

	Planta								
	Cebada			Girasol			Veza		
	CE-T	CE-42,5	CE-85	GI-T	GI-42,5	GI-85	VE-T	VE-42,5	VE-85
pH	8,4	8,3	8,1	8,5	8,2	8,0	8,5	8,3	8,1
C.E. (µS/cm)	209	294	467	219	401	572	215	363	434
Ca (mg/kg)	3308	3899	4051	3796	4744	4177	3956	3647	3982
Mg (mg/kg)	590	631	674	638	625	642	583	541	538
Na (mg/kg)	76	112	70	80	62	85	64	78	74
K (mg/kg)	360	318	341	313	332	334	317	273	296
N (%)	0,082	0,102	0,120	0,085	0,108	0,134	0,090	0,113	0,129
P (mg/kg)	20,2	35,2	45,7	23,2	53,3	76,3	29,8	54,0	65,3
M.O. (%)	1,38	1,84	1,77	1,45	1,56	1,87	1,24	1,55	1,63
% C AH	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,06	0,04	0,06
% C AF	0,13	0,18	0,15	0,11	0,16	0,17	0,08	0,16	0,16
% C EHT	0,18	0,23	0,20	0,16	0,23	0,22	0,14	0,20	0,22

Efecto en la planta.

No se apreciaron síntomas de toxicidad, ni de deficiencia en los cultivos desarrollados en las macetas tratadas con lodos. No existieron diferencias significativas entre el porcentaje de germinación de las semillas sembradas en los tratamientos con lodos y el control, obteniéndose un porcentaje de germinación cercano al 90% para las tres especies ensayadas.

La biomasa seca se incrementó en los tratamientos con lodos frente al control, en las tres especies ensayadas (figura 2). Este incremento de biomasa debe estar relacionado con el incremento de macronutrientes (especialmente el fósforo), micronutrientes (Cu y Zn, deficitarios en suelos calcáreos) y materia orgánica en los suelos enmendados con lodos.

La altura de la parte aérea, así como la longitud del sistema radical, aumentaron ligeramente con la aplicación de lodos en la veza (figura 2). Sin embargo, la respuesta fue la opuesta para la cebada y el girasol ya que la altura disminuyó ligeramente con la adición de lodos y la longitud media de las raíces se redujo significativamente con respecto a los testigos. De esta forma, el incremento de biomasa asociado a la aplicación de lodos no se tradujo en un aumento significativo en la altura de la cebada y el girasol. Este mismo efecto ha sido descrito por otros autores (Gil, et al. 2001).

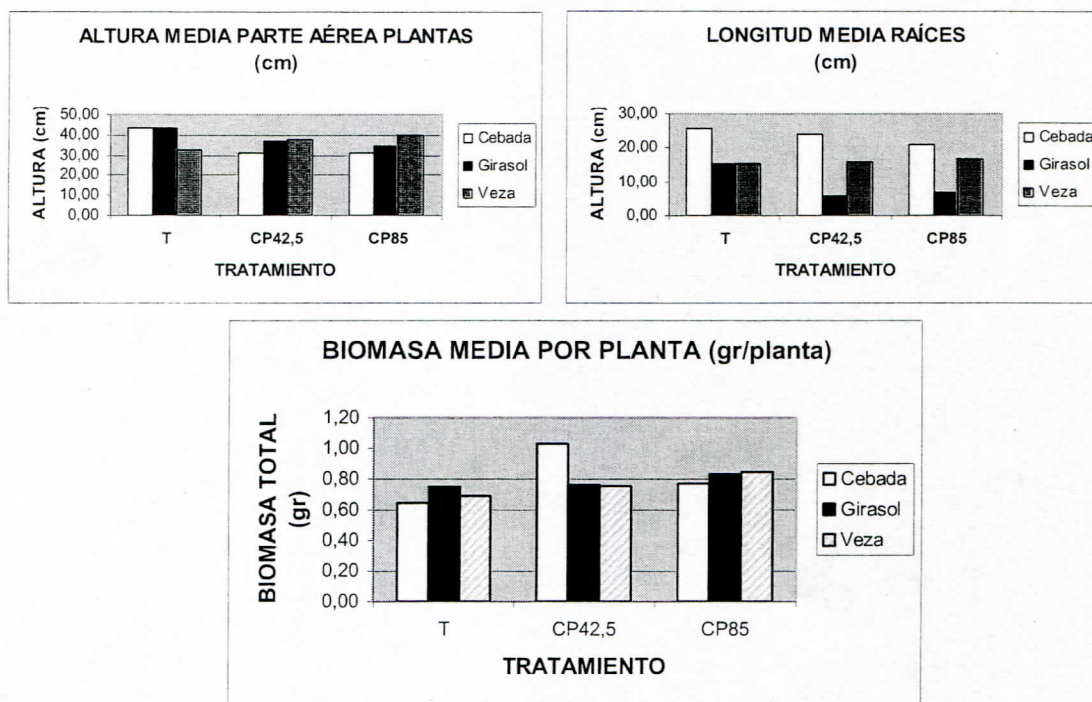


Figura 2: Características morfológicas de las plantas: Altura media, longitud media raíces y Biomasa media total por planta.

Se produjo un incremento en el contenido de N en la parte aérea de las plantas con la aplicación de lodos, sin embargo solamente se obtuvieron diferencias significativas entre el tratamiento con lodos a dosis alta (85 t/ha) y el control. Los cationes (Ca, Mg, Na y K) en parte aérea de la planta aumentaron con la aplicación de lodos en las tres especies ensayadas, obteniéndose diferencias significativas entre las tres especies para el Ca y el Mg. Para el K se encontraron diferencias significativas entre la cebada y las otras dos plantas, y para el Na entre la cebada y el girasol. Asimismo se obtuvieron diferencias significativas para el Mg y el K entre la dosis alta de lodos y el control y para el Na entre los tratamientos que aplicaban lodos y el control.

Estudio de los metales pesados. Interacción suelo-planta.

Metales en suelos.

Las concentraciones totales de Cu, Zn, Cr y Pb en suelos se incrementaron linealmente con la dosis de lodo aplicada (con diferencias significativas entre los tratamientos y las dosis) en los ensayos con las tres especies vegetales, no observándose el mismo efecto para el Ni (tabla 3).

Tabla 3: Metales pesados totales en suelos, parte aérea y raíz de las plantas cultivadas.

Metal (mg/kg)		Cebada			Girasol			Veza		
		T	42,5	85	T	42,5	85	T	42,5	85
Pb	Suelo	18,7	22,0	27,3	19,0	22,3	27,3	18,0	23,0	24,7
	P. aérea	3,9	4,5	5,2	4,2	5,0	4,8	4,9	6,4	5,1
	Raíz	2,0	7,0	13,5	2,1	3,7	6,5	3,7	6,6	8,4
Cu	Suelo	9,8	12,3	16,7	9,8	13,7	16,3	10,1	14,3	16,7
	P. aérea	8,7	16,7	18,5	6,6	8,0	12,0	9,3	7,5	9,3
	Raíz	6,6	13,7	30,0	12,3	12,0	19,0	18,5	19,5	24,0
Ni	Suelo	18,0	17,0	25,0	15,3	23,0	16,3	11,6	13,0	13,3
	P. aérea	3,7	7,0	9,5	2,1	2,0	1,7	3,4	4,3	3,4
	Raíz	11,2	20,0	19,5	9,5	3,6	8,0	14,5	7,2	7,8
Zn	Suelo	68,7	84,7	107,3	57,0	85,3	108,0	63,7	106,7	98,3
	P. aérea	27,0	63,7	62,3	32,3	43,7	27,0	55,0	71,5	87,0
	Raíz	61,5	69,0	119,5	27,0	39,0	27,0	60,5	97,0	101,0
Cr	Suelo	30,0	36,7	40,3	28,0	36,3	40,7	28,7	35,7	40,3
	P. aérea	15,7	26,7	37,0	2,1	1,9	4,5	2,9	3,5	2,3
	Raíz	18,5	37,0	65,0	9,1	7,6	11,0	28,0	10,5	12,0

Estos cuatro metales, Cu, Zn, Cr y Pb, mostraron un elevado índice de correlación (con nivel de significación de 0,01) entre ellos, sin embargo, el Ni no mostró ninguna relación con el resto de los metales (tabla 4).

Tabla 4: Coeficientes simples de correlación (r) entre distintos parámetros del suelo.

	pH	C.E.	M.O.	Pb	Cu	Ni	Zn	Cr
pH	1,000	-,953**	-,639**	-,870**	-,858**	-,228	-,793**	-,793**
C.E.		1,000	,617**	,865**	,851**	,140	,786**	,719**
M.O.			1,000	,681**	,656**	,265	,639**	,639**
Pb				1,000	,891**	,314	,817**	786**
Cu					1,000	,132	,879**	,852**
Ni						1,000	,188	,147
Zn							1,000	,769**
Cr								1,000

*: Nivel de significación de 0,05.

** : Nivel de significación de 0,01.

En estudios anteriores de larga duración de aplicación de lodos residuales en campo realizados por nuestro grupo de investigación, Sastre et al. (2001) encontraron

que el Ni queda unido a las fracciones de hidróxidos de Fe y Mn, quedando en forma más soluble que los metales asociados a la materia orgánica. Precisamente el Ni fue el único metal del suelo para el que se obtuvieron diferencias en función de la planta cultivada y, al igual que para el K y Mg en suelos, se encontraron diferencias significativas entre la veza y el grupo formado por la cebada y el girasol (figura 3).

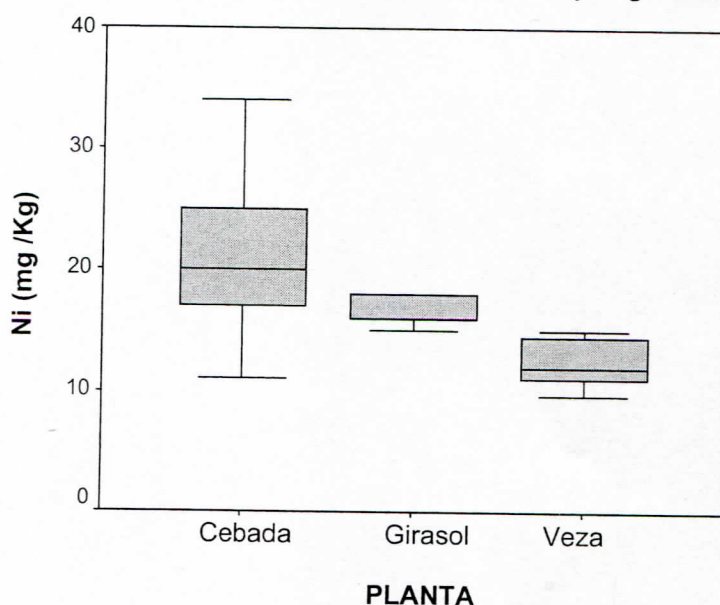


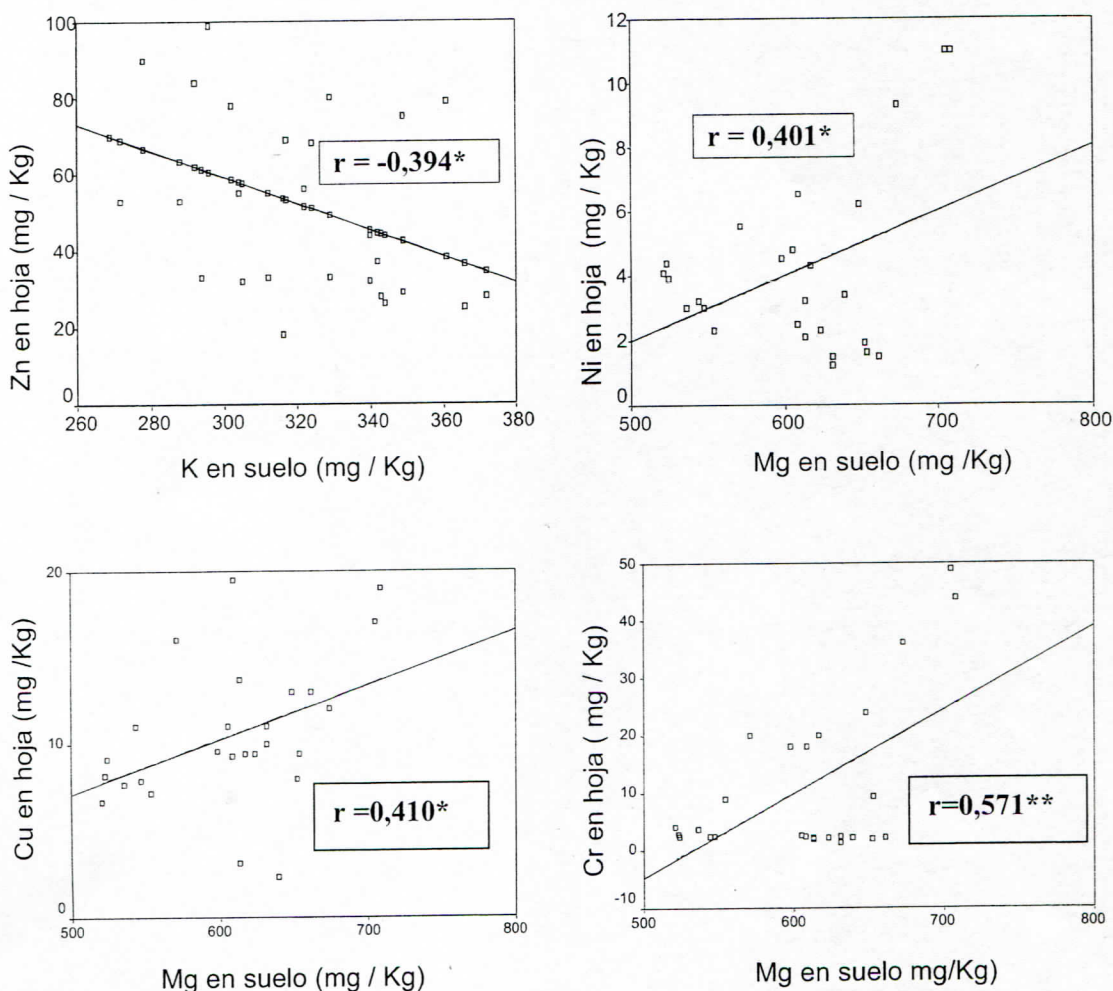
Figura 3: Diferencias significativas ($P < 0,05$) obtenidas del análisis del contenido de Níquel en suelos en función de la planta cultivada.

La materia orgánica en el suelo mostró una elevada correlación (con nivel de significación 0,01) con los metales Pb, Cu, Zn y Cr en los suelos (tabla 4), lo que implica que estos metales están asociados a la materia orgánica oxidable. Tanto el contenido en metales pesados, como el porcentaje de materia orgánica en los suelos aumentan con la dosis aplicada de lodos. El incremento de Cu y Zn en estos suelos tras la aplicación de los lodos puede ser incluso beneficioso, pues constituyen micronutrientes indispensables para el desarrollo de las plantas y que suelen estar en deficiencia en este tipo de suelos calcáreos (Gil, et al, 2001). Sin embargo, otros metales como el Cr o el Pb que no son esenciales biológicamente para las plantas pueden tener consecuencias más perjudiciales. En todos los casos, los valores de metales en los suelos fueron menores que los límites establecidos en la legislación vigente en Europa (Directiva 86/278/CEE).

Metales en planta

En el análisis de metales en la parte aérea de la planta (tallos y hojas), se observó en la cebada un incremento lineal en el contenido de todos los metales (excepto el Zn) con la aplicación de lodos, sin embargo este efecto no se produjo tan marcadamente en el girasol y la veza aunque sí aumentó el contenido de metales en las plantas cultivadas en suelos enmendados con lodos (tabla 3). Se encontraron diferencias significativas

para el Cu entre la dosis de 85 t/ha y el testigo, aunque no entre las dos dosis aplicadas de lodos. También se observaron diferencias significativas en el contenido de metales en la parte aérea en función de la planta ensayada, siendo la cebada la que acumuló más metales seguida de la veza y por último del girasol, lo que corrobora los resultados obtenidos por Madrid y Kirkham (2002). De esta forma, se encontraron diferencias significativas para el Cu, Ni y Cr entre la cebada y las otras dos especies ensayadas. En el caso del Zn las diferencias significativas se obtuvieron entre la veza y las otras dos especies. Se encontraron unos altos coeficientes de correlación entre algunos metales; Zn, Ni, Cu y Cr, de las partes aéreas de las plantas y el Mg y el K en el suelo (figura 4), de lo que se deduce la influencia de estos cationes en el suelo para la absorción y acumulación de metales en la planta.



*: Nivel de significación de 0,05.

**: Nivel de significación de 0,01.

Figura 4: Gráficas de regresión para los cationes asimilables del suelo, K y Mg, y el Zn, Cu, Ni y Cr en la parte aérea de las plantas.

El contenido de metales totales en el sistema radicular de la cebada se incrementó con la dosis de lodo aplicada. Esta misma tendencia se produjo en la veza para el Pb, Cu y Zn, y en el girasol para el Cu (tabla 3). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los tres tratamientos ensayados. Al igual que en la parte aérea, la cebada fue la especie que acumuló más metales en la parte radical, seguida de la veza, siendo el girasol la especie que menos metales acumuló. Se encontraron diferencias significativas entre los contenidos de Ni y Cr en las raíces de la cebada y el girasol, así como entre los contenidos Zn entre el girasol y las otras dos especies.

Indices de traslocación y acumulación de metales

Con el objetivo de evaluar la translocación de metales pesados desde el suelo hacia la planta y su acumulación en las mismas, se elaboraron dos índices: un coeficiente de translocación del suelo a la planta y un índice de acumulación de metales pesados en la parte aérea de las plantas cultivadas en los suelos enmendados con lodos frente a los testigos (tabla 5).

Tabla 5: Índice de translocación (I.T.) de metales entre el suelo y la parte aérea de la planta e Índice de Acumulación (I.A.) de metales en las plantas enmendadas frente a los testigos.

Metal	Índice	Cebada			Girasol			Veza		
		T	42,5	85	T	42,5	85	T	42,5	85
Pb	I.T.	0,21	0,20	0,19	0,22	0,22	0,18	0,27	0,28	0,21
	I.A.	1,00	1,15	1,33	1,00	1,19	1,14	1,00	1,31	1,04
Cu	I.T.	0,89	1,11	1,11	0,67	0,59	0,74	0,92	0,52	0,56
	I.A.	1,00	1,57	2,12	1,00	1,22	1,83	1,00	0,80	1,00
Ni	I.T.	0,21	0,41	0,38	0,14	0,09	0,11	0,30	0,33	0,25
	I.A.	1,00	1,89	2,57	1,00	0,94	0,82	1,00	1,24	0,98
Zn	I.T.	0,39	0,75	0,58	0,57	0,51	0,25	0,86	0,67	0,89
	I.A.	1,00	2,36	2,31	1,00	1,35	0,84	1,00	1,30	1,58
Cr	I.T.	0,52	0,73	0,92	0,08	0,05	0,11	0,10	0,10	0,06
	I.A.	1,00	1,70	2,36	1,00	0,89	2,16	1,00	1,22	0,81

El primer índice se calculó mediante el ratio de concentración de metal en planta frente a concentración total en suelo. El segundo índice representa la relación entre la concentración de metales en plantas enmendadas con lodos y la concentración de metales en las plantas testigo. El estudio de los valores de los índices anteriores muestra diferencias significativas en la translocación y acumulación de metales en las plantas dependiendo de la naturaleza de la planta y del elemento químico estudiado. Así, el índice de translocación aumenta con la aplicación de lodos en la cebada en todos los elementos, salvo el Pb. Sin embargo, este efecto no se produjo para el girasol y la veza. Especialmente interesante resulta la capacidad de la cebada para traslocar y acumular Cu y Zn. De igual forma, la acumulación de todos los metales estudiados en las plantas de cebada enmendadas con lodos frente a los testigos aumentó con la dosis

aplicada. Este efecto se produjo también en el Pb, Cu y Cr para el girasol y en el Zn para la veza.

CONCLUSIONES

El aumento general obtenido en el contenido de nutrientes y materia orgánica en los suelos constata el efecto fertilizante y enmendante que tiene la aplicación de lodos en este tipo de suelos degradados. Este incremento de nutrientes en suelos se tradujo en un aumento de nutrientes en los tejidos aéreos de las plantas. La aplicación de lodos incrementó la biomasa seca de las tres especies ensayadas, no encontrándose ninguna anomalía en su fisiología y desarrollo. Sin embargo, la misma aplicación tuvo un efecto diferencial en la altura de la planta y en la longitud de su sistema radical, según la especie ensayada (efecto positivo en la veza y negativo en la cebada y el girasol). La especificidad en el crecimiento con la aplicación de lodos debe estar relacionada con el metabolismo propio de cada especie y con su capacidad de utilizar los aportes nutricionales y orgánicos de los lodos o de soportar la elevada acumulación de metales que supone su aplicación. Las concentraciones de Cr, Cu, Pb y Zn en suelos se incrementaron con la dosis de lodo aplicada, si bien todos los valores se mantuvieron por debajo de los límites marcados por la legislación vigente en Europa (Directiva 86/278/CEE). Incluso el aumento de los niveles de Cu y Zn con la aplicación de lodos puede resultar beneficioso, pues constituyen micronutrientes deficitarios en estos tipos de suelos calcáreos. La acumulación de metales totales de las plantas aumentó con la dosis de lodo aplicada, tanto en la parte aérea como en la radical. Esto puede ser debido a que los lodos de depuradora introducen sustancias húmicas en el suelo en forma de ácidos fúlvicos principalmente, los cuales retienen los cationes metálicos formando compuestos de elevada solubilidad, aumentando la disponibilidad de los metales para ser absorbidos por las plantas.

Del estudio de los índices elaborados se deduce que, en general la capacidad de translocación y acumulación de metales es superior en la cebada que en la veza y el girasol, siendo significativos los valores acumulados en el caso del Cr, Ni y Cu. Este hecho implica la necesidad del control de los contenidos en metales pesados en cereales para evitar su paso a la cadena trófica, y así evitar posibles efectos para la salud humana. Sin embargo, confirma a la cebada como una especie susceptible de ser utilizada en procesos de fitoremediación de suelos contaminados con dosis medias-bajas de metales pesados.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha desarrollado gracias a los proyectos CAO-03-MAD-01 (FEOGA) y REN02-02501 (MCYT) y a una beca predoctoral del INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria).

REFERENCIAS

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutants profiles. *Environmental Pollution* **119**: 177-193.
- Almas, E. and Singh, B.R. (2000). Phytoavailability of cadmium and zinc at different temperature and organic matter levels. *Cost Action 837, Workshop. Phytoremediation 2000. State of the Art in Europe (An Intercontinental Comparison)*. Greece. pp: 47-48.
- Brown, S.L., Henry, C., Chaney, H., Compton, H. and DeVolder, P. (2003). Using municipal biosolids in combination with other residuals to restore metal-contaminated mining areas. *Plant and Soil* **249**: 203-215.
- Cabezas, J.G.; Alonso, J.; Yébenes, L.; Vicente, M.A. y Lobo, M.C. (2003). Aplicación de lodos residuales para la restauración de la cubierta vegetal en suelos degradados. En: *Control de la erosión y degradación del suelo*, R. Bienes y M.J. Marqués (Eds.). Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria. Madrid. pp. 279-282.
- Coker, E.G., Matthews, P.J. 1983. Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. *Water Science Technology* **15**: 209-225.
- Chaney, R.L. 1994. Trace metal movements. Soil-Plant system and bioavailability of biosolids-applied metals. In: *Sewage sludge: Land utilization and the environment*, SSSA. Miscellaneous Publication. Clapp, C.E., Larson, W.E., Dowdy R.H. (Eds.)
- Chaney, R.L. and Ryan, J.A. (1993). Heavy metals and toxic organic pollutants in MSW-composts: research results on phytoavailability, bioavailability, fate, etc. In: *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*. Eds. H.A.J. Hoitink and H. M. Keener, pp: 451-506. Renaissance Pub, Worthington, OH.
- Chang, A.C.; Warneke, J.E.; Page, A.L.; Lund, L.J. (1984). Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *Journal of Environmental Quality*, **13**: 87-91.
- Davis, R. D. 1981. Uptake of molybdenum and copper by forage crops growing on sludge-treated soils and its implication for the health of grazing animals. In: *Proc. Intl. Conf. on Heavy Metals in the Environment*, CEP Consultants, Edinburgh, Scotland. pp. 194-197
- Directiva del Consejo 86/278/CEE de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medioambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura.
- Fitzgerald, P. R.; J. Petersen, and C. Lue-Hing. (1985). Heavy metals in tissues of cattle exposed to sludge-treated pastures for eight years. *Am. J. Vet. Res.* **46**: 703-707.
- Gil, F.J.; de Andrés, E.F.; Tenorio, J.L.; Martínez F., and Walter I. (2001). Sewage sludge effects on production of wild legume shrubs. *Bioprocessing of Solid Waste and Sludge*. <http://www.orbit-online.net/journal>, Vol. 1, N°4.
- Hearing, K.C.; Daniels, W.L. and Feagly, S.E. (2000). Reclaiming mined lands with biosolids, manures and papermill sludges. In *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. Eds. R. Barnhisel. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI. pp. 615-644.
- Hooda, P.S., McNulty, D., Alloway, B.J., Aitken, M.N. 1997. Plant availability of heavy metals in soils previously amended with applications of sewage sludge. *J. Sci. Food Agric.* **73**: 446-454.
- Kannavou, A., Chronopoulou-Sereli, A. And Chronopoulos, J. (2000). Lead uptake by native mediterranean plants grown on the metalliferous soils of Lavrio-Attica, Greece. pp 116.
- Korentejar, (1991). A review of the agricultural use of sewage sludge: Benefacts and potencial hazards. *Water SA*. **17** (3): 189-196.
- Madrid, F. y Kirkha M.B. Heavy metal uptake by barley and sunflower grown in abandoned animal lagoon soil 2002. 17th WCSS. Symposium 42. Thailandia.
- McBride, M.B. (1995). Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? *Journal of Environmental Quality*, **24**: 5-18.
- McBride, M.B.; Sauvé, S. and Hendershot, W. (1997). Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *E. J. Soil. Sci.* **48**: 337-346.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. (1994). Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III.

- Nelessen, J.E. and Fletcher, J.S., (1993). Assesment of published literature on the uptake, accumulation and translocation of heavy metals by vascular plants. *Chemosphere*, **27**: 1669-1680.
- Oberle, S.L., Keeney, D.R. 1994. Interaction of sewage sludge with soil-crop-water systems. In: Sewage sludge land utilization and the environment, SSSA. Miscellaneous Publication. Clapp, C.E., Larson, W.E., Dowdy, R.H. (Eds.).
- Quinteiro Rodríguez, M. P.; Andrade Couce, M. L.; De Blas Varela, E. (1998). Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: experiencias de campo. *Edafología*. **5**: 1-10.
- Rodríguez, L.; Lopez-Bellido, F.J.; Carnicer, A. y Alcalde-Morano, V. (2003). Phytoremediation of mercury-polluted soils using crop plants. *Fresenius Environmental Bulletin*. **12** (9): 967-971.
- Salt, D.E, Smith,R.D. and Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **49**: 643-68.
- Sastre, I.; Vicente, M.A. y Lobo, M.C. (2001). Behaviour of cadmiun and nickel in a soil amended with sewage sludge. *Land Degradation and Development*, **12** (1), 29-36
- Sastre, I.; Vicente M.A.; Walter, I. y Lobo M.C. (1993). Influencia del aporte continuado de lodos residuales sobre las propiedades fisico-quimicas de un suelo. *Quimica Agrícola y Alimentaria. El agua, El suelo y la planta Vol 1*
- Sastre-Conde, I; Alonso, J; Guerrero, A.M.; Pinilla, P.; Cabezas, J.G., Lobo, M.C. (2003). Dinámica de nutrientes y metales pesados en cultivo de olivar con dos tipos de lodos residuales. *En: Control de la erosión y degradación del suelo*. R. Bienes y M.J. Marqués (Eds.). Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria. Madrid. pp: 303-307.
- Schmidt, J.P. (1997). Understanding phytotoxicity treshold for trace elements in land-applied sewage sludge. *J. Environ. Qual.* **26**: 4-10.
- Sopper, W.E. (1993). Municipal Sludge use for Land Reclamation. Lewis Publishers, Ann Arbor, MI.
- Varanini, Z. and Pinton, R. (2000). Direct Versus Indirect Effects of Soil Humic Substances on Plant Growth and Nutrition. Pinton, Valarini and Nannipieri (Ed.). *The Rhixosphere*. Marcel Dekker, Inc. pp: 141-150.
- Vlamiis J., Willian, D.E. Corey, J.E., Page, A.L. y Ganje T.J. (1985). Zn and Cd uptake by barley in field plots fertilized seven years by urban and suburban sludge. *Soil Science*. **139**: 81-87.
- Williams, D.E.; Vlamiis, J.; Pukite, A.H.; Corey, J.E. (1980). Trace element accumulation, movement, and distribution in the soil profile from massive applications of sewage sludge. *Soil Science*, **129**: 119-132.
- Witte, H., T. Langenohl, and G. Offenbacher. (1988). Investigation of the entry of organic pollutants into soils and plants through the use of sewage sludge in agriculture. Part A. Organic pollutant load in sewage sludge. Part B. Impact of the application of sewage sludge on organic matter contents in soils and plants. *Korresponding Abwasser*, **13**:118-136.